



USAID
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS
UNIDOS DE AMÉRICA

COLOMBIA

Programa BIOREDD+

ENTREGABLE 12: ESTIMACIONES DE TODAS LAS RESERVAS DE CARBONO EN ÁREAS DEL PROYECTO

Número de Subcontrato: EEP-I-00-06-00013-00-GEM-00

Nombre: GeoEcoMap Inc.

Septiembre de 2014

Este documento fue producido para revisión por la Agencia de Estados Unidos para el Desarrollo Internacional. Fue elaborado por GeoEcoMap Inc. para el Proyecto BIOREDD+, número de tarea AID-514-TO-11-00002.

Contenido

TABLA DE CONTENIDO.....	.
1. DEFINICIÓN DE TAREA 12	3
2. ANTECEDENTES	3
3. FUENTES DE DATOS Y PROCESAMIENTO	3
4. DEFINICIONES	5
4. METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DE CARBONO	6
4. MATERIA ORGÁNICA EN ÁRBOLES EN SUPERFICIE (AGT):.....	8
5. MATERIA ORGÁNICA NO FORESTAL EN SUPERFICIE (AGNT):	10
6. MATERIA ORGÁNICA SUBTERRÁNEA (BG):	11
7. MATERIA ORGÁNICA EN MADERA MUERTA EN PIE Y EN PISO (LDW & SDW): ..	12
8. MATERIA ORGÁNICA POR DESECHOS O TOCONES DE ÁRBOL MUERTO (DTS):	15
9. MATERIA ORGÁNICA EN SUELOS (SOM):	16
10. ESTIMACIÓN DE LA MEDIA Y EL ERROR ESTÁNDAR DE LAS RESERVAS DE CARBONO	19
11. REFERENCIAS.....	22

1. Definición de la tarea 12

Estimados de todas las reservas de carbono identificadas dentro del alcance del proyecto (en superficie, bajo tierra, muertas, desechos, suelos) derivadas de las pautas de la IPCC y de inventarios regionales en campo en las áreas del proyecto. Esto incluye archivos SIG por tramos de las reservas de carbono a una resolución espacial de 1-Ha sobre los cuatro nodos de proyecto y las zonas de colchón. Los resultados de los estimados de carbono deben encontrarse dentro del umbral de error del 10% con el intervalo de confianza del 95% requerido por los VCS. Este informe solo proveerá una estimación de las reservas de carbono y el análisis de incertidumbre. Todos los mapas y los archivos SIG por tramos se entregarán con la Tarea 10.

2. Antecedentes

Para estimar los factores de emisiones para la deforestación y degradación, se incluirán las siguientes reservas de carbono en los sistemas de monitoreo de carbono forestal (FCMS, en inglés) y sistemas MRV futuros: biomasa en superficie, biomasa bajo tierra, madera muerta caída y en pie, desechos y suelos. Para la reserva de suelos, las emisiones se basarán en una estimación de las pérdidas en la reserva de carbono de referencia del suelo usando factores que varían debido al uso de la tierra, las prácticas de gestión, y cualquier insumo (IPCC 2006 GL)—todo esto se captura en una ecuación que ofrece un estimado de las emisiones por área unitaria por año en las siguientes secciones. Aquí, incluimos emisiones por deforestación entendida como la conversión de bosques (intactos, degradados, secundarios) a un uso no forestal (pastizales, tierras agrícolas, asentamientos, etc.) y degradación, entendida como la conversión de bosques intactos a bosques degradados. Los factores de emisiones se relacionan con el inventario de carbono en las reservas seleccionadas para cada tipo de uso de la tierra y cambios en la cubierta vegetal. En este informe, se dan los detalles para estimar los valores de las reservas seleccionadas usadas para calcular los factores de emisiones.

3. Fuentes de Datos y Procesamiento

Las fuentes de datos y cualquier paso para procesar los datos para calcular las reservas de carbono se resumen así:

1. Mediciones del proyecto basadas en lotes. Las mediciones basadas en lotes dentro de la clase LULC o el estrato forestal se usan tanto para calibrar y validar los datos de las unidades de muestra por detección remota (RSSU, en inglés) y para medir las reservas de carbono. En general, tenemos los siguientes lotes para evaluar el modelo LiDAR: 1) 15 lotes permanentes de 1-Ha dentro de los transectos LiDAR. Dividimos cada lote en cuatro lotes de 0.25 Ha para incrementar el número de lotes para calibración y validación. Esto rindió 60 lotes a 0.25 Ha. 2) Tenemos 15 conjuntos de lotes satelitales que caen dentro de transectos LiDAR y cada conjunto tiene 8 lotes satelitales a 0.25 Ha para un número total de 120 con 109 lotes ubicados

precisamente dentro de las imágenes LiDAR. 3) recolectamos 45 lotes en 0.25 Ha sistemáticamente dentro de un transecto LiDAR. En total, tuvimos 214 lotes a un tamaño de 0.25 Ha para desarrollar y probar la precisión del modelo predictivo LiDAR. Estos lotes estaban ubicados en distintos tipos de bosque según lo indicado por la observación en campo y comparación con los datos de detección remota. Tabla 7.1. Número de lotes establecidos en el proyecto BioREDD y utilizados para desarrollar y probar la precisión del modelo de biomasa por LiDAR.

Tabla 3.1. Número de lotes establecidos en el proyecto BioREDD y utilizados para desarrollar y probar la precisión del modelo de biomasa por LiDAR.

Lotes de inventario forestal	Tamaño y forma	Número de lotes en transectos LiDAR	Número de lotes de 0.25 Ha	Número de 0.25 Ha en transectos LiDAR
16 lotes permanentes	1 Ha, 100 m x 100 m	15	64	60
16 lotes satelitales agrupados	0.25 Ha (50 m x 50 m)	15	128	109
1 conjunto de lotes de muestreo sistemático	0.25 Ha (50m x 50 m)	45	45	45
Total	-	75	237	214

2. Seguimos la metodología VM0006 en la asignación de los lotes y valores de biomasa con las clases LULC. Si la degradación no se incluye, la clase LULC de un lote específico de biomasa se determine con base en el mapa LULC del tiempo más cercano al momento más cercano del lote de biomasa. Aquí, usamos el mapa LULC desarrollado para el programa e incluimos observaciones satelitales de 2012. Aunque los datos de lotes se recolectaron en 2013, la clase LULC asociada con el lote también fue verificada por el equipo de campo y examinando las imágenes LiDAR y aéreas adquiridas en 2013. Si hay múltiples mediciones disponibles para un solo lote de inventario permanente de biomasa, solo se utilizó el valor más reciente de la densidad del inventario de carbono. No multiplicamos mediciones para cada lote, sino que tuvimos varios lotes dentro de cada clase LULC que se usaron para crear la media y varianza de la biomasa para cada clase según lo descrito en informes anteriores (Informes 8 y 9) Como la degradación se incluye, las agregaciones de clases LULC no forestales siguen los procedimientos como si no se incluyera la degradación. Sin embargo los lotes de inventario de biomasa ubicados en el área forestal son asignados al estrato forestal o a la clase LULC apropiada usando el modelo de estratificación forestal o el mapa desarrollado y mencionado anteriormente. En el proyecto BioREDD, la densidad promedio del inventario de carbono en las clases LULC forestales y no forestales debe evaluarse usando lotes de muestreo no permanentes. De manera alternativa, pueden usarse valores conservadores tomados de la literatura científica para cuantificar la densidad del inventario de carbono en tierra no-forestal. La aplicabilidad de estos valores por defecto debe ser confirmada por el validador. Dentro de una clase LULC o un estrato forestal, la ubicación de los lotes de muestreo se selecciona de manera aleatoria. Esta aleatorización se hizo *ex-ante* por un programa de computador según las herramientas GIS NOAA. Todos los puntos aleatorios caen dentro de los datos de las imágenes LiDAR y por tanto evitarán cualquier elección subjetiva de la ubicación de lotes tanto para el cálculo de carbono y la calibración y

validación de los datos de detección remota. Para cada lote de muestra, registramos la clase LULC y el tipo forestal observados, y también estimamos el cierre de la cubierta forestal a partir de LiDAR y de las reseñas en campo si dicha información ha sido producida por el equipo en tierra.

1. Para desarrollar ecuaciones alométricas locales se han usado árboles talados de diferentes ubicaciones que representen las clases de especie, diámetro y altura para los bosques de la región. También se separaron las ecuaciones alométricas para tres tipos de bosques: tierra firme (Colinas), bosques inundados (Guandal) y manglar. Estas ecuaciones se utilizaron para calcular la biomasa forestal en superficie a partir de datos en campo las cuales fueron utilizados a su vez para calibrar y validar los estimados de biomasa forestal por detección remota. Para otras reservas de carbono se utilizaron mediciones directas y/o modelos alométricos existentes.
2. Estimados basados en detección remota: Usamos muestras aleatorias con datos LiDAR aéreos en estratos forestales y LULC sobre la región de BioREDD para estimar la biomasa forestal en superficie. Estos estimados de biomasa forestal en superficie también se usaron para extrapolar otras reservas de carbono sobre las regiones de BioREDD desarrollando modelos o relaciones sencillas entre la reserva de carbono en superficie y otros componentes.
3. Estimados tomados de la literatura. Entre las reservas de carbono, no medimos la biomasa no-forestal en superficie que muchas veces se hace usando métodos de muestreo destructivo. Más bien, utilizamos la información existente en la literatura para estimar la reserva de carbono en vegetación no forestal y desechos y reportarla en nuestros cálculos. Tampoco se midió el carbono del suelo durante el proyecto de BioREDD. Sin embargo, usamos el mapa de suelos y los atributos de carbono disponibles para la región para estimar las reservas de carbono en el suelo y su incertidumbre.

4. Definiciones

El enfoque principal de este informe consiste en documentar el cálculo y la precisión de todas las reservas de carbono en las regiones de BioREDD. Todos los cálculos se realizan para cumplir los requerimientos indicados en la metodología VM0006. Las reservas de carbono se describen así:

1. **Materia Orgánica de Árboles en Superficie AGT** (definida como OM_{AGT} en VM0006): La materia orgánica en superficie determinada mediante la medición de la estructura forestal como diámetro (D), altura (H) y densidad de todos los árboles usando el corte D apropiado indicado en la ecuación alométrica (p.ej., $D \geq 10$ cm) dentro del lote de muestreo. La ecuación alométrica usada para calcular la AGT se desarrolló localmente para el proyecto BioREDD y permaneció fija durante el período de validación de la línea base.
2. **Materia inorgánica no forestal en superficie AGNT**: La vegetación no forestal en superficie incluye todas las plantas y árboles inferiores al tamaño mínimo de los árboles medidos en la reserva de biomasa forestal, todos los arbustos, y cualquier otra vegetación viva no herbácea. Los componentes de esta reserva no se midieron durante el proyecto BioREDD. De manera alternativa, hemos usado la materia orgánica en superficie estimada usando los valores por defecto del IPCC siguiendo la herramienta apropiada como la última versión de la Herramienta CDM *Estimación de inventarios de carbono y cambios en inventarios de carbono para árboles y arbustos en*

actividades de proyectos AR CDM.

3. **Materia orgánica subterránea BG:** La reserva de materia orgánica se estima a partir de la materia orgánica en superficie usando una relación entre la materia orgánica en superficie y subterránea, como una relación de raíz a rama. Similar a las constantes utilizadas para la materia orgánica en superficie, la relación o alometría para estimar la densidad de carbono subterráneo debe permanecer fija durante el período de validación de la línea base.
4. **Materia orgánica de madera muerta en piso (LDW):** La madera muerta en piso se ha muestreado con el método de intersección lineal con los lotes permanentes de 1-Ha. Cada pieza de madera muerta es asignada a tres clases de descomposición como (a) Sano, (b) Intermedio, o (c) Podrido, con base en una prueba de machete. La biomasa estimada para cada pieza de madera muerta está sujeta a un factor de reducción de densidad. Aunque el proponente del proyecto podrá usar el factor de reducción de densidad más aplicable, los factores de reducción de densidad por defecto son 1, 0.80, y 0.45 respectivamente para las clases de descomposición- sano, intermedio y podrido.
5. **Materia orgánica de la madera muerta en pie (SDW):** Los árboles muertos en pie deben medirse usando los mismos procedimientos usados para medir árboles vivos con la adición de una clase de descomposición y la adición de un factor apropiado de reducción de la biomasa. Específicamente, a todos los árboles muertos en pie se les deberá asignar una de dos condiciones: (a) Árboles muertos que solo han perdido hojas y ramitas, y (b) Árboles muertos que han perdido hojas, ramitas, y ramas pequeñas (diámetro < 10 cm) y usar un factor apropiado de reducción de la biomasa para cada condición. El proponente del proyecto podrá usar factores de reducción de biomasa basados en datos/estudios locales o nacionales o usar un factor por defecto de 0.975 para los árboles en la condición (a) y 0.80 para árboles en la condición (b). Si el árbol ha perdido todas sus ramas, dicho árbol deberá considerarse un Tocón de Árbol Muerto.
6. **Materia orgánica de un tocón de árbol muerto (DTS):** Si la altura del tocón es superior al diámetro del punto medio de un tocón o es un árbol muerto sin ramas, la biomasa debe estimarse usando el método encontrado en Ormerod (1973). Primero, el volumen del tocón de árbol muerto deberá estimarse y luego la densidad de la madera para estimar la biomasa en DTS multiplicado por el volumen.
7. **Materia orgánica en el suelo (SOM):** La reserva de carbono orgánico en suelos deberá estimarse usando muestras de suelos tomadas a diferentes horizontes de suelos. La profundidad hasta la cual se toman y se analizan las muestras de suelo debe ser de al menos 30 cm según la recomendación de IPCC GPG-LULUCF (2003). En estas muestras debe registrarse la profundidad, la densidad a granel y la concentración de la materia orgánica seca. Para el proyecto de BioREDD no se midió directamente el carbono en el suelo. Sin embargo, usamos las pautas dispuestas por la herramienta CDM AR 6.0 (procedimiento para determinar cuándo la contabilidad de la reserva de carbono en suelos puede ignorarse de manera conservadora en actividades de proyectos CDM A/R, Versión 1). Usamos una combinación de mapas de suelos para la región y las cifras de carbono para profundidades de hasta 1.0 m para agregar las regiones de BioREDD y las clases LULC.

4. Metodología de Estimación de Carbono

La metodología para estimar reservas de carbono se basa en tres pasos:

1. Estimación en tierra de reservas de carbono: Desarrollamos una serie de lotes de campo según lo descrito en informes anteriores para tomar muestras de las reservas de carbono forestal en las regiones de BioREDD. El levantamiento de campo y la recolección de datos ocurrió en el verano de 2013 y finalizó a inicios del 2014. Los lotes en campo incluyeron lotes permanentes (1 Ha) y temporales (0.25 Ha) a lo largo y ancho de 16 regiones de estudio que cubrían una variedad de tipos forestales incluyendo bosques intactos y degradados. Las mediciones incluyeron el diámetro de todos los árboles > 10 cm. El umbral de 10 cm se seleccionó para cumplir con los requerimientos de la metodología REDD VCS y las pautas de la IPCC. Las mediciones se convirtieron a biomasa forestal en superficie usando una combinación de ecuaciones alométricas existentes. Sin embargo, encontramos grandes diferencias entre las ecuaciones alométricas, particularmente entre selvas tropicales y bosques húmedos desde Chave et al. 2005. La región del Chocó tiene grandes variaciones en las aguas lluvia y la composición de especies en comparación con los árboles del Amazonas donde fueron talados la mayoría de los árboles sobre los cuales se basan las ecuaciones de Chave et al. (2005). Las mediciones de suelos también incluyeron los árboles muertos, tanto de pie como en piso para proveer el carbono en la materia orgánica en pie y en tierra.
2. El equipo BioREDD desarrolló una ecuación alométrica local para convertir las mediciones de la estructura de los árboles en campo en biomasa. Los modelos alométricos se desarrollaron con base en un conjunto de árboles talados. Para desarrollar el modelo alométrico del proyecto para la biomasa y el carbono, CONIF realizó mediciones en cuatro sitios, dos de ellos en la región del Pacífico Norte cerca de los Concejos Comunitarios Indígenas de Mutatá y Río Pepé, y los otros dos en la región del Pacífico Sur donde CONIF y miembros del Concejo Comunitario de Bajo Mira y Frontera y Concosta realizaron trabajos de campo a finales del 2010 y principios del 2011 (Saldarriaga, et al., 2011). Los cuatro sitios se encuentran dentro de la región de BioREDD con el propósito de establecer proyectos REDD+ en el futuro. El trabajo de campo del modelo de alometría duró cuatro meses, ~75 días de trabajo en campo y ~ 45 días de trabajo en laboratorio. Los objetivos principales del estudio eran:
 1. Adaptar las funciones alométricas existentes a los bosques de monte, incluyendo un mayor número de especies e individuos distribuidos en clases de diámetro desde 10 cm con un énfasis especial en las clases superiores ($D > 70$ cm).
 2. Desarrollar modelos para estimar la biomasa de los bosques secundarios.
 3. Desarrollar modelos para estimar la biomasa de algunas especies de palmas. La selección de los sitios se basó en varios criterios incluyendo el interés comunitario, bosque estatal y diversidad, cobertura e interés científico, seguridad en el lugar de trabajo, costos de operación, logística y transporte. El trabajo con las comunidades fue parte clave para lograr los objetivos. Talamos 296 árboles con diámetros ≥ 5 cm en cuatro sitios, dos en el Pacífico Norte y dos en el Pacífico Sur, incluyendo 240 árboles de bosques maduros, 56 árboles de bosques secundarios y 97 palmeras. A su vez, de los 240 individuos del bosque maduro, 160 son de bosques en tierra firme en las colinas medianas y bajas, 46 de los bosques inundados cerca de la llanura

costera (Guandal), y 34 árboles vinieron de los manglares.

3. Estimación de reservas de carbono en regiones de BioREDD: Para extrapolar las mediciones en tierra a todas las regiones de BioREDD, usamos los estimados de la biomasa en superficie a partir de datos LiDAR muestreados aleatoriamente en estratos forestales y clases LULC. De las mediciones en tierra, desarrollamos reservas de carbono y relaciones de las reservas de carbono con la densidad de carbono en superficie y usamos la densidad de carbono en superficie derivada de LiDAR y el mapa LULC para extrapolar los estimados en regiones más grandes. Los estimados también incluyen métodos de propagación del error para derivar la incertidumbre para las reservas de carbono estimadas en unidades LULC dentro de las áreas de proyecto de BioREDD.
4. El abordaje estadístico incluyó estimados de media y varianza de reservas de carbono a partir de los datos de lotes y extrapolando la media y la varianza a regiones enteras de BioREDD. La metodología para extrapolar los estimados a la región de BioREDD se describe más abajo en la sección 11.

4. Materia Orgánica en Árboles en Superficie (AGT):

Para estimar la AGB de los lotes de muestra, usamos el modelo alométrico desarrollado para la región de estudio por el equipo de BioREDD. Primero usamos el modelo Chave et al. 2005 para bosques húmedos para estimar la biomasa para cada lote. Sin embargo, el proyecto BioREDD proveyó financiación para desarrollar ecuaciones alométricas locales para los árboles de los bosques de la Costa Pacífica. Los modelos desarrollados para la región incluyeron tres tipos de bosques en las regiones: Tierra firme (Colinas), Bosques inundados (Guandal), y manglares (Manglar). Los árboles se talaron en la región y se combinaron con árboles talados de investigaciones pasadas para desarrollar los modelos. Con los datos recolectados en los cuatro sitios se desarrollaron los modelos alométricos aquí presentados. Se usaron seis modelos para estimar la biomasa de los bosques maduros de la costa colombiana. De los seis modelos, tres son para estimar la biomasa de bosques maduros en general y tres para estimar la biomasa por tipo de bosque, guandal, manglar y colinas. Además, se desarrollaron tres modelos para estimar la biomasa de los bosques secundarios. También se incluyen árboles de todas las clases de diámetro incluyendo individuos con diámetros mayores encontrados en el estudio. Finalmente, se desarrollaron dos modelos para estimar la biomasa de palmeras. Los tres grupos de modelos: bosque maduro, bosque secundario y palmeras, son sólidos desde un punto de vista estadístico. Sin embargo, se considera que los modelos hallados para un bosque maduro pueden estimar más precisamente la biomasa de todos los bosques incluyendo bosques de sucesión, porque la base de datos de árboles de bosques maduros incluye individuos de todas las clases de tamaño incluyendo árboles grande y, a su vez, la base de datos de bosques secundarios.

Aunque todos los modelos presentados son sólidos desde un punto de vista estadístico, pero deberán ser validados para determinar cuál de los modelos mide mejor la biomasa. Para una validación independiente se requieren datos recolectados por otros investigadores o de otros estudios y sitios.

Los modelos incluyen análisis de incertidumbre y comparación con las ecuaciones alométricas de Chave et al. (2005) y (2014), y se reportaron las diferencias (véase el reporte de proyecto BioREDD BR-SUBK-FP-022). Las ecuaciones se resumen a continuación:

Colinas	$\ln(\text{AGB}) = -2.130 + 2.015 \times \ln(\text{D}) + 0.724 \times \ln(\text{H}) + 1.002 \times \ln(\text{WD})$
Guandal	$\ln(\text{AGB}) = -2.328 + 1.833 \times \ln(\text{D}) + 0.724 \times \ln(\text{H}) + 0.151 \times \ln(\text{WD})$
Manglar	$\ln(\text{AGB}) = -2.818 + 2.185 \times \ln(\text{D}) + 0.724 \times \ln(\text{H}) + 0.650 \times \ln(\text{WD})$

Para estimar la biomasa de las palmeras en todo tipo de bosques, usamos la ecuación alométrica desarrollada por Saldarriaga (2014).

$$\ln(\text{AGB}) = -0.173 + 0.700 \times \ln(\text{D}^2 \times \text{H} \times \text{WD})$$

Para los valores de biomasa estimados en lotes individuales permanentes y de satélite, véase la tabla 6.3. Para cada lote, también tenemos un identificador y una descripción por el grupo en campo que resume el tipo y la condición de los bosques como degradados, bosques secundarios, Guandal, Colinas, Manglar, etc. La mayoría de los lotes caen en bosques mixtos, y por tanto los valores de biomasa estimados a partir de los modelos alométricos se aplican a nivel de los árboles para proveer estimados de la biomasa al nivel del lote.

Para árboles que no superan el umbral de 10 cm, usamos un modelo basado en varios datos de lotes incluyendo datos en Panamá y Colombia consultados de la literatura (Chave et al., 2003; Sierra et al., 2007; Usuga et al., 2010). El siguiente modelo se utilizó para estimar la relación (R_t) de la AGB para árboles > 1 cm hasta la AGB para árboles > 10 cm. Después de aplicar la relación, la biomasa total se calculó mediante:

$$R_t = 1.483 \text{AGB}_{10\text{cm}}^{-0.0613} \quad n = 65, \quad R^2 = 0.91$$

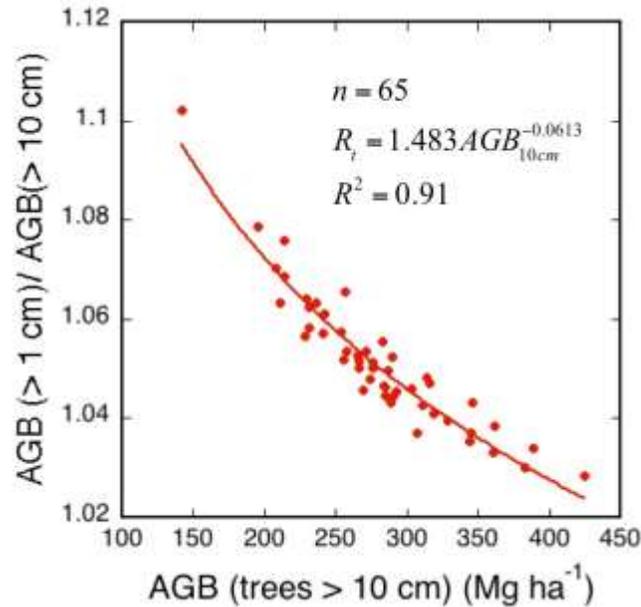


Fig. 4.1. La relación de la biomasa forestal con todos los árboles > 1cm a la biomasa de árboles superiores al umbral de 10 cm medida en campo. La relación corregirá la biomasa desde las medidas a la biomasa total.

Usamos un valor de fracción de carbono de $C_F = 0.485$ para convertir la biomasa en cifras de carbono. Este número es menor que el valor conservador de 50% sugerido por la pauta IPCC, pero es el promedio de valores reportados en la región y la mayoría de los bosques amazónicos (Higuchi et al., 1994).

Tabla 4.1. Media y desviación estándar de la biomasa forestal de 15 lotes agrupados dentro de las áreas de proyectos de BioREDD.

Nombre de Lotes Agrupados	Número de muestras WD	WD Promedio de Árboles	WD Promedio de Árboles y Palmeras	Número promedio de Árboles por Ha	AGB (Mg ha ⁻¹)
Acapa	30	0.658	0.630	357	157.9 ± 50.6
Bahia_Malaga	81	0.551	0.531	636	232.1 ± 65.9
Bajo_Calima_I	100	0.562	0.537	694	168.6 ± 56.6
Bajo_Calima_II	70	0.593	0.563	634	184.7 ± 37.4
Bajo_Mira	30	0.569	0.543	460	118.1 ± 24.6
Buenavista	73	0.675	0.657	505	318.2 ± 40.0
Canton_S_Pablo	38	0.601	0.588	569	228.4 ± 51.7
Chigorodo	98	0.507	0.505	485	275.0 ± 95.4
Chontadural	168	0.503	0.480	538	221.8 ± 29.6
Concosta	84	0.636	0.606	612	376.5 ± 472.0
Curvarado	73	0.533	0.522	442	355.4 ± 157.0
Pizarro	81	0.518	0.495	396	175.9 ± 51.6
Rio_Cajambre	31	0.494	0.457	1300	138.5 ± 39.0
Rio_Pepe_I	160	0.487	0.476	538	181.1 ± 31.8
Rio_Pepe_II	160	0.524	0.502	769	230.3 ± 60.6

5. Materia Orgánica No Forestal en Superficie (AGNT):

Los inventarios de carbono promedio en las reservas de biomasa no forestales en superficie por unidad por lo general se estiman con base en datos previamente publicados, datos por defecto o mediciones en campo. La reserva de biomasa en superficie maderera no forestal incluye árboles de menor tamaño al mínimo medido en la reserva de biomasa forestal, lianas, todos los arbustos, y toda la vegetación viva no herbácea. La vegetación no forestal puede muestrearse usando marcos de muestreo destructivos y/o donde sea conveniente, en lotes de muestreo en conjunto con una ecuación alométrica para arbustos. Para AGNT, solo usamos los arbustos y nos referimos a la literatura para tener una relación sencilla entre la biomasa en superficie de los arbustos vs. la biomasa en superficie de árboles en bosques (Philips et al. 1998; 2009; Araujo et al., 1996).

Usamos datos de varias fuentes con los arbustos y las lianas recolectadas para desarrollar una relación entre la biomasa de los arbustos y la biomasa de los árboles > 10 cm en los bosques. Estos lotes se encuentran principalmente en Panamá (BCI; Condit et al., 2000), Costa Rica (La Selva; Clark et al., 2000), y Perú (Parque Nacional Manu; Malhi et al. 2010). El modelo desarrollado a partir de los conjuntos de datos proveen valores aproximados sugeridos por la literatura con base en datos en tierra (Philips et al. 1998; Brown y Lugo, 1992). La relación entre la tasa de biomasa por arbustos en superficie y la biomasa forestal (árboles > 10 cm) es:

$$R_s = 0.832AGB_{10cm}^{-0.654} \quad n = 31, \quad R^2 = 0.76 \quad (5.1)$$

Para convertir la biomasa de arbustos a carbono, usamos un valor de fracción de carbono de $C_F=0.47$ según lo recomendado por el valor defecto de la metodología VCS para la reserva de carbono no forestal.

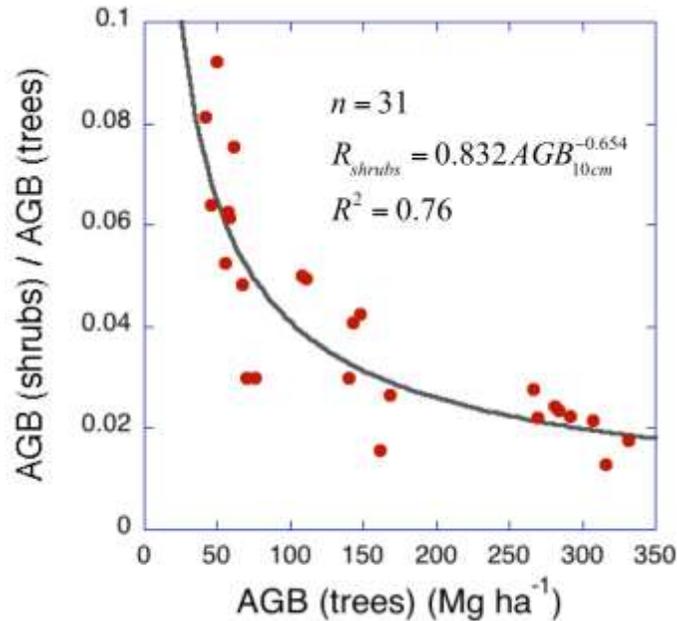


Fig. 5.1. Relación de biomasa no forestal vs biomasa de árboles vivos en superficie en bosques derivada de observaciones de campo en bosques tropicales.

6. Materia Orgánica Subterránea (BG):

El inventario de carbono promedio en la biomasa forestal subterránea por área unitaria se estima con base en las mediciones en campo de los parámetros en superficie en los lotes de muestra. Las relaciones de raíces a ramas se combinan con el método de las Ecuaciones Alométricas para calcular la biomasa subterránea a partir de la biomasa en superficie. No es práctico medir la biomasa subterránea de manera rutinaria en bosques tropicales. También es muy difícil desarrollar una ecuación alométrica apropiada para la biomasa de raíces en cada país. Más bien, la biomasa subterránea se estima a partir de una relación bien aceptada para bosques tropicales húmedos, desarrollada por Mokaney et. al. (2006; también reportada en el IPCC 2006 GL), que predice confiablemente la biomasa de las raíces con base en la biomasa de las ramas:

$$BGB = 0.235 * AGB \text{ if } AGB > 125 \text{ Mg ha}^{-1}$$

$$BGB = 0.205 * AGB \text{ if } AGB \leq 125 \text{ Mg ha}^{-1} \quad (6.1)$$

Donde:

BGB = biomasa subterránea

AGB = biomasa en superficie

La mayoría de nuestros lotes en bosques en tierra firme tenían una AGB en superficie $> 125 \text{ MgHa}^{-1}$. Sin embargo, habían muchos bosques degradados y secundarios seleccionados aleatoriamente en nuestros sistemas de lotes con una biomasa un pocodistinta y probablemente unas relaciones distintas entre raíces y ramas. Decidimos usar los datos de Mokany et al. (2006) para desarrollar un modelo que pueda utilizarse para todo tipo de bosque. Este modelo también lo utilizaron Saatchi et al., (2011) para estimar la biomasa subterránea de bosques tropicales en tres continentes. Una síntesis de los datos de la literatura disponible, además de una eliminación de los datos recolectados usando métodos poco claros o incorrectos, proveyó un modelo alométrico para estimar la biomasa forestal subterránea. Usamos esta ecuación para estimar la biomasa subterránea a partir de la biomasa en superficie:

$$BGB = 0.489 * AGB^{0.89} \quad (6.2)$$

donde BGB es la biomasa subterránea y AGB es la biomasa en superficie en unidades de Mg Ha^{-1} de peso seco. Para desarrollar una incertidumbre en la relación anterior, usamos las mediciones de Mokany et al. y examinamos las variaciones en la relación entre biomasa subterránea:en superficie o las relaciones de biomasa raíz:rama con respecto a los tipos de vegetación usados en el estudio. Al incluir sitios en plantaciones forestales y pastizales y tundra, el RMSE al predecir la biomasa fue de 9.46 Mg Ha^{-1} y el error relativo de aproximadamente 23.2% (Fig. 6.1). La aplicación del modelo anterior al estimado del BGB tiene un error estándar de 0.659 Mg Ha^{-1} . Para convertir la biomasa subterránea a carbono (BG) usamos un valor de fracción de carbono de 0.485, similar a la reserva de carbono en superficie.

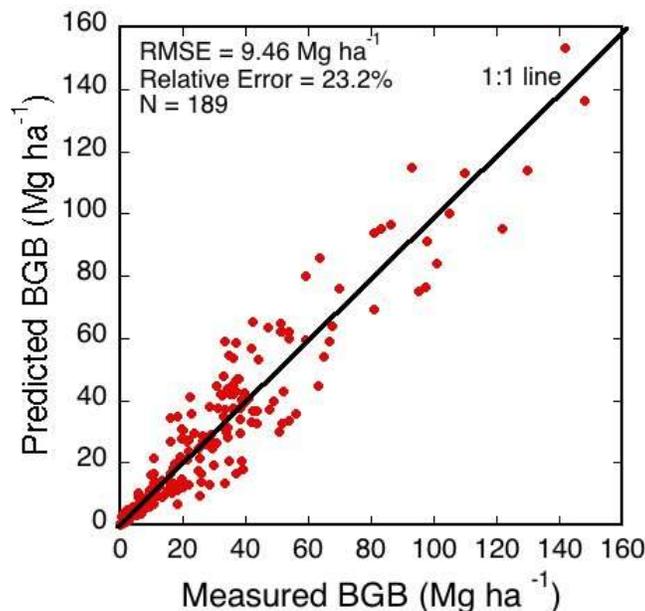


Fig. 6.1. BGB Pronosticado versus medido usando una ecuación alométrica y datos de 189 lotes en campo de Mokany et al. (9). La línea sólida muestra el 1:1 con el RMSE y el error relativo. Los datos se obtuvieron a través de comunicaciones personales con K. Mokany.

7. Materia Orgánica en Madera Muerta en Piso y en Pie (LDW & SDW):

Los métodos para medir los inventarios de carbono en madera muerta, en piso y en pie, aparecen en los procedimientos operativos normativos definidos en los protocolos para mediciones en campo usados por CONIF para el proyecto BioREDD. Los métodos básicos son los siguientes: (1) para madera muerta en pie, el volumen del tallo principal se estima a partir de mediciones del diámetro de la base y la altura; esto se multiplica entonces por la densidad de las especies (si se conoce o por una densidad promedio de 0.65). (2) Para la madera muerta en piso, se toman mediciones para estimar el volumen y su clase de densidad (sano, intermedio y podrido) según la metodología. Se adquieren múltiples muestras de las tres clases de madera muerta para determinar su densidad de madera promedio ($t\ m^{-3}$) según la metodología. El volumen por la clase de densidad por la densidad de la madera muerta da como resultado un estimado del inventario de carbono en madera muerta en piso.

La cantidad final de muestras de madera muerta será un mínimo de 30 muestras por área de proyecto de BioREDD. Estas muestras se adquieren dentro de los lotes permanentes de 1Ha y se utilizan para estimar la media y la varianza o el error estándar de la biomasa de la madera muerta para cada lote. Para calcular la cantidad de masa seca contenida en los escombros gruesos ($DBH \geq 10\ cm$) en lotes permanentes de 1-Ha, la longitud y el diámetro en los extremos de los troncos caídos y en pie se midieron según los protocolos RAINFOR. Usamos 462 puntos con muestras de madera muerta en todos los 15 lotes permanentes de 1-Ha para calcular la densidad de la biomasa ($g\ cm^{-3}$).

Todas las muestras individuales, excepto los de los lotes de Chigorodó y Buenavista, se utilizaron para asignar una clase de descomposición así: 1) Madera sólida, corteza recién caída intacta o empezando a caer, ocasionalmente con pequeñas ramas todavía anexas, 2) no madera sólida, en peor condición que la anterior pero donde todavía es difícil clavarle una puntilla o un cuchillo con la mano, 3) madera blanda, descompuesta, que se colapsa fácilmente al golpearla o al pararse encima. El cálculo de la masa seca de cada tronco, obtenido multiplicando el volumen (m^3) por la densidad de cada madera de escombro (WD) estimado de muestras en el campo. Para obtener el volumen de cada tronco, usamos la ecuación de Smal para el volumen de un tronco de árbol en forma de cono:

$$vol = \frac{\pi L}{8} (d_1^2 + d_2^2) \quad (7.1)$$

Donde L es la longitud del tronco y d_1 y d_2 son el diámetro del tronco en cono en dos puntos.

Para estimar la WD, se genera un modelo de regresión entre la clase asignada a cada nivel de descomposición de tronco (1, 2 o 3) y la WD de laboratorio calculada para los troncos recolectados (véase el informe de BioREDD para mediciones en tierra). Encontramos diferencias significativas entre la WD media para cada clase de descomposición. En vez de usar los factores de reducción de densidad para cada clase de descomposición, estimamos directamente los valores de la densidad de madera para estimar la biomasa. Los valores medios obtenidos en el laboratorio proveen un modelo de regresión simple que se ajusta entre la WD media de $0.564\ (g\ cm^{-3})$ para la clase de descomposición 1, $0.411\ (g\ cm^{-3})$ para la clase 2, y $0.258\ (g\ cm^{-3})$ para la clase 3. Conociendo el volumen de los troncos en cada lote de muestra y la densidad de la madera, pudimos estimar la biomasa seca en ($MgHa^{-1}$) de la madera muerta en pie, en piso y total para cada lote agrupado en las áreas de proyecto BioREDD.

Luego usamos los valores promedio y, o bien desarrollamos una relación entre la biomasa de la madera muerta y la biomasa de la madera viva al nivel del lote o usamos una relación para convertir la biomasa de árboles vivos en superficie a biomasa de madera muerta tanto en pie como en piso. Al desarrollar el modelo o la relación para estimar la biomasa de la madera muerta a partir de la biomasa viva en superficie, también exploramos el uso de parámetros auxiliares como el grado de fragmentación o la cubierta vegetal derivada de datos LiDAR sobre cada lote para mejorar la estimación de la madera muerta. La introducción de parámetros auxiliares como la cubierta fraccionada se basa en el hecho que la biomasa de la madera muerta se incrementa en bosques degradados y secundarios en comparación con bosques intactos y de crecimiento antiguo. El uso de datos auxiliares mejoró el estimado hasta cierto punto

$$\begin{aligned}
 AGB_{SDW} &= \frac{0.000484}{f} AGB_{10cm}^{1.614} \\
 AGB_{LDW} &= \frac{0.0353}{f} AGB_{10cm}^{1.093} \\
 AGB_{Total} &= \frac{0.0424}{f} AGB_{10cm}^{1.106}
 \end{aligned} \tag{7.2}$$

donde f es la fracción de la cubierta de árboles en cada lote. La fracción de la cubierta se estima desde los datos LiDAR separando las brechas en la cubierta forestal en cada lote permanente. Puede usarse el mismo método durante un levantamiento de madera muerta usando fotografía con ojo de pez u otras técnicas de silvicultura. Para convertir la biomasa en carbono, usamos el valor por defecto de 0.485 al igual que en los árboles vivos para estimar los valores de la reserva de carbono.

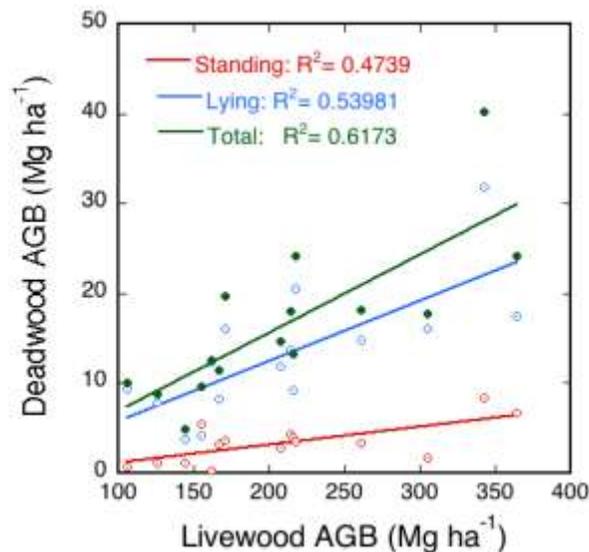


Fig. 7.1. Relación entre la biomasa en superficie de árboles con diámetro > 10 cm medidos en el lote y la biomasa de madera muerta en pie, en piso y total. Los números de la biomasa de madera muerta han sido mejoradas corrigiéndolas con la fracción de cubierta según aparece en las anteriores relaciones.

Tabla 7.1. Resumen de los datos utilizados para estimar la masa seca total (Mg ha^{-1}) de la madera muerta en cada uno de los 15 lotes de muestra agrupados y divididos entre componentes en pie y en piso en los bosques de la región de BioREDD.

Nombre de Lotes Agrupados	Número de Muestras de Laboratorio	Densidad Promedio de la Madera	Número de lotes de muestra	Biomasa de madera muerta en pie (Mg ha^{-1})	Biomasa de madera muerta en piso (Mg ha^{-1})	Biomasa total de madera muerta (Mg ha^{-1})
Acapa	37	0.520	112	1.2	3.8	5.0
Bahia_Malaga	30	0.486	407	4.8	27.8	32.6
Bajo_Calima_I	30	0.544	173	6.1	4.7	10.8
Bajo_Calima_II	30	0.435	339	5.5	24.8	30.3
Bajo_Mira	30	0.249	386	1.2	15.9	17.1
Buenavista	30	0.498	170	1.8	16.5	18.3
Canton_S_Pablo	35	0.492	78	5.4	16.9	22.3
Chigorodo	30	0.321	397	4.0	17.4	21.4
Chontadural	30	0.233	53	3.2	13.7	16.8
Concosta	30	0.409	144	7.6	19.6	27.2
Curvarado	30	0.333	364	10.3	39.3	49.6
Pizarro	30	0.518	289	0.3	15.9	16.2
Rio_Cajambre	30	0.381	217	1.6	11.6	13.1
Rio_Pepe_I	30	0.401	460	3.6	9.2	12.8
Rio_Pepe_II	30	0.308	337	4.6	10.9	15.6

8. Materia Orgánica por Desechos o Tocones de Madera Muerta (DTS):

Para estimar el inventario de carbono en los desechos, se recolectan cuatro muestras de desechos de cada lote de muestra, usando un marco de muestreo ubicado en cuatro posiciones aleatoriamente seleccionadas dentro del lote. Las cuatro muestras se mezclan bien creando una muestra compuesta y se toma su peso húmedo. Una sub-muestra se toma de la muestra compuesta, se seca en el horno, y se pesa de nuevo para determinar su peso seco. La relación de peso seco-a-húmedo de la sub-muestra se calcula y se usa para estimar el peso seco de la muestra compuesta de desechos.

Si los PP no desean hacer mediciones basadas en muestreos para estimar el inventario de C en los desechos, podrán usar un método por defecto basado en factores y descrito en esta sección. El método por defecto basado en factores solo aplica si los desechos se quedan en el sitio y no son retirados de los límites del proyecto por cualquier tipo de actividad antropogénica.

El valor del factor conservador por defecto que expresa el inventario de carbono en desechos como un porcentaje del inventario de carbono en la biomasa forestal se selecciona según la dirección dispuesta en la tabla relevante de la Sección 8 a no ser que pueda encontrarse información transparente y verificable para justificar un valor diferente.

Tabla 8.1. Valores por defecto de inventarios de carbono en desechos en términos de los inventarios de carbono de los árboles vivos en superficie.

Bioma	Elevación	Agua Lluvia	Factor por Defecto
Tropical	<2000 m	< 1000 mm/año	4%
Tropical	<2000 m	1000-1600 mm/año	1%
Tropical	<2000 m	> 1600 mm/año	1%
Tropical	>2000 m	Todas	1%

Para el proyecto BioREDD, también hemos consultado la literatura buscando estimados de desechos y tocones de árboles en el piso forestal en Colombia. Datos de lotes de muestra en Colombia (Sierra et al. 2007) recolectados en seis sublotes de 1 m² (1 m x 1 m) dentro de los lotes permanentes también se usaron para estimar la relación de biomasa en superficie de los desechos finos combinados y el material herbáceo y no forestal a la biomasa total por árboles vivos en el lote. En estos lotes toda la vegetación herbácea y vegetación no forestal < 1 cm en D y todos los desechos finos en pie. La vegetación herbácea y los desechos finos se recolectaron completamente de estos sublotes y todo el material se transportó al laboratorio para allí determinar su peso seco. La metodología desarrollada por Sierra et al. (2007) es similar a las pautas del IPCC para estimar las reservas de carbono de los desechos.

Crecimiento Antiguo: $AGB_{litter} = 0.01538 * AGB_{10\text{ cm}}, SE=1.337 \text{ Mg ha}^{-1}$

Bosque Degradado/Secundario: $AGB_{litter} = 0.09438 * AGB_{10\text{ cm}}, SE=0.3417 \text{ Mg ha}^{-1}$
(8.1)

Encontramos que las anteriores relaciones eran más relevantes para la región de estudio de BioREDD. Todos los datos vienen de Porce en la provincia de Antioquia, Colombia, adyacente a la región del norte del Chocó en Colombia.

9. Materia Orgánica en Suelos (SOM):

La deforestación y conversión de bosques a tierras agrícolas y pastizales puede cambiar el carbono en el suelo hasta diferentes niveles dependiendo de las prácticas pos-deforestación con entradas y salidas de carbono en el sistema de suelos. Las principales prácticas de gestión que afectan los inventarios de C en suelos en tierras agrícolas son la gestión de residuos, gestión de aradura, gestión de fertilizante (tanto fertilizantes minerales como enmiendas orgánicas), elección de cultivo e intensidad de gestión de cosecha (p.ej., cosecha continua versus rotaciones de cultivos con períodos de barbecho), gestión de irrigación, y sistemas mixtos con cosechas o pastizales o heno en rotación secuencial. Además, el drenaje y el cultivo de suelos orgánicos reduce los inventarios de C en suelos (IPCC 2006 GL, Vol. 4, Ch. 5). Por tanto, es necesario estimar el carbono en el suelo mediante técnicas de inventario y estimar los cambios del carbono en el suelo. Deben recolectarse muestras de suelo en cada área de proyecto según el método IPCC 2006 GL para conversión de bosques a tierras de cultivo (y se asume que puede usarse para todas las actividades de deforestación que perturban el suelo) así:

$$\Delta C = (SOC_0 - SOC_D) / D$$

$$SOC = SOC_{REF} * F_{LU} * F_{MG} * F_I \quad (9.1)$$

Donde:

SOC_0 y SOC_D = carbono orgánico en suelos inicial y carbono orgánico en el tiempo por defecto para alcanzar el equilibrio (en el tiempo D); t C Ha⁻¹ a una profundidad de 30 cm.

D = Dependencia temporal de los factores de cambio de inventario, que es el período por defecto de transición a un nuevo valor SOC de equilibrio (20 años)
SOC_{REF} = inventario de carbono de referencia; MgC ha⁻¹ a 30 cm (del trabajo de muestreo de suelos en campo; véase abajo)

F_{LU} = factor de cambios en el inventario para sistemas de uso de tierra o subsistemas para un uso en particular, adimensional

F_{MG} = factor de cambios de inventario para una gestión de manejo, adimensional

F_I = factor de cambios de inventario para la entrada de materia orgánica, adimensional

Los valores de F_{LU}, F_{MG}, y F_I para distintas actividades en la región de BioREDD. Aquí, proveemos estimados del carbono en suelos de referencia SOC_{REF} hasta una profundidad de 30 cm para la región del proyecto usando datos existentes y mapas disponibles para la costa colombiana. No hubo muestreo directo de las reservas de carbono en suelos durante el proyecto de BioREDD. Por tanto, seguimos una metodología por defecto para estimar las reservas de carbono en clases LULC usando una combinación de los datos en la literatura y mapas de suelos con valores de carbono a un horizonte de 30 cm.

1. Estimación ex ante de inventarios de carbono pre-deforestación de carbono orgánico en suelos

Para estimar el inventario de carbono en carbono orgánico en suelos por área unitaria para las clases LULC en el momento t, usamos datos de la literatura para bosques húmedos tropicales y bosques secundarios y degradados de Colombia (Sierra et al., 2007). Los datos de muestra de suelos recolectados en este estudio muestran que las concentraciones de carbono orgánico en suelos en los primeros 30 cm eran $29.8 \pm 0.73 \text{ mg g}^{-1}$ para bosques primarios y $23.4 \pm \text{Mg g}^{-1}$ para bosques secundarios. Se observaron evidencias de una reducción en las concentraciones de carbono orgánico en bosques secundarios (**p**-valor < 0.05 desde una comparación de 2 muestras) en comparación con bosques primarios. Usando un factor de corrección para las diferencias en las densidades a granel entre las clases forestales por edad, el SOC hasta una profundidad de 30 cm fue de $96.60 \pm 2.47 \text{ Mg ha}^{-1}$ en bosques primarios y de $72.18 \pm 2.54 \text{ Mg ha}^{-1}$ en bosques secundarios. Estas cifras nos permitieron tener un valor base para calibrar los valores de carbono en

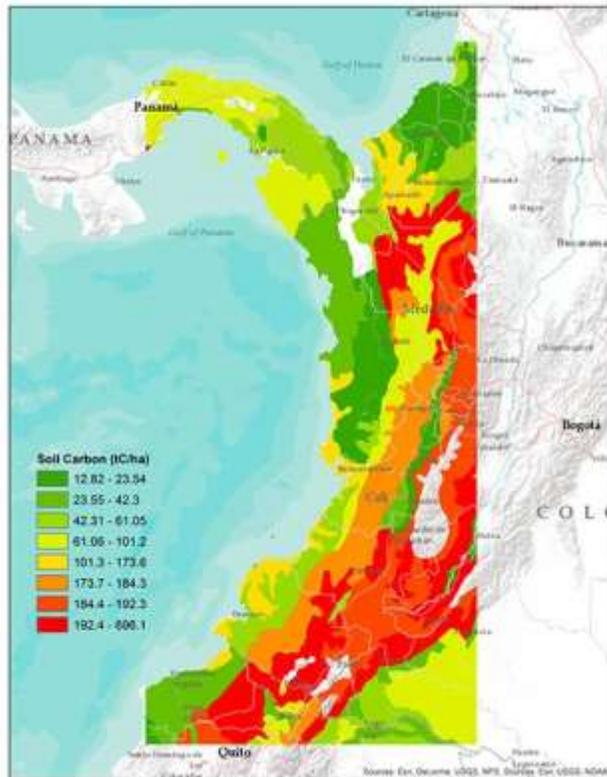


Fig. 9.1 Mapa de carbono en suelos de la región de la costa Pacífica colombiana derivada del mapa de suelos armonizado (FAO).

suelos para la región BioREDD. También usamos el mapa armonizado de carbono en suelos producido por la FAO (Véase la Fig. 9.1.).

La Base de Datos Armonizada de Suelos del Mundo es una base de datos por tramos de 30 arco-segundos con más de 15,000 unidades distintas de mapeo de suelos que combina actualizaciones regionales y nacionales existentes de información de suelos alrededor del mundo (SOTER, ESD, Soil Map of China, WISE) con la información contenida en el Mapa de Suelos del Mundo de FAO-UNESCO a una escala de 1:5 000 000 (FAO, 1971-1981). El mapa del suelo tiene una estructura estandarizada con varios atributos que permite enlazar los datos de los atributos con el mapa de tramas para mostrar o consultar la composición en términos de unidades de suelos y la caracterización de parámetros de suelos seleccionados (carbono orgánico, pH, capacidad de almacenamiento de agua, profundidad de suelos, capacidad de intercambio del suelo y la fracción arcillosa, nutrientes intercambiables totales, contenido de cal y yeso, salinidad, clase de textura y granulometría).

Intersectamos el mapa de suelos con el mapa LULC para la región de BioREDD. El mapa de suelos tiene una resolución espacial de 1 km y el mapa LULC de 30 m. Primero calculamos el número de píxeles de 1-km dentro de cada clase LULC en cada región del proyecto de BioREDD y manejamos los píxeles del mapa de suelos como el valor de muestreo. Usando el contenido de carbono a un horizonte de 30 cm, estimamos la media y la varianza del carbono en la capa de suelo orgánico usando los siguientes pasos:

1. Calcular el contenido de carbono en el suelo a partir del mapa para bosques primarios y secundarios en la región de Ponce y estimar los valores de calibración para el mapa de suelos armonizado comparando los dos estimados. Encontramos que un valor de calibración promedio de 0.93 para bosques primarios y 0.89 para bosques secundarios o degradados (ambos constituyen la misma clase en nuestro mapa). Usamos estos factores para corregir todas las clases forestales y de bosques degradados/secundarios en LULC. Para otras clases de cubierta vegetal, usamos la clase de calibración forestal de 0.93 para corrección.
2. Contamos todos los píxeles de 1-km en las clases de cubierta vegetal y estimamos la densidad media de carbono y varianza para cada estrato o clase LULC usando:

$$\mu_y = \sum_{j=1}^m w_j \mu_{y_j}$$

$$\text{var}(\mu_y) = \sum_{j=1}^m w_j^2 \text{var}(\mu_{y_j}) = \sum_{j=1}^m w_j^2 \frac{s_j^2}{n_j} - \sum_{j=1}^m w_j \frac{s_j^2}{N}$$

9.2

donde

μ_y : densidad media de carbono en el área de proyecto

μ_{y_j} : densidad media de carbono en el estrato j

m: número de estratos en el área del proyecto

w_j : área proporcional del estrato j

s_j^2 : varianza de muestras en el estrato j con

n_j : número de unidades de muestra en el estrato j

3. Después de estimar el carbono en todas las clases LULC, ajustamos las cifras para tierras deforestadas para reflejar el impacto de las actividades en las tierras de cultivo

y los pastizales sobre el contenido de carbono orgánico en suelos para los estimados de la línea base.

2. Ajuste ex ante de inventarios de carbono en suelos pos-deforestación:

Se asume que los inventarios de carbono en suelos pos-deforestación son los inventarios promedios a largo plazo en la tierra después de la deforestación. Para estimar este inventario promedio a largo plazo pos-deforestación del carbono orgánico en suelos, el inventario medio en suelos estimado en la Parte 1 a t=0 se multiplica por los factores de cambio de inventario, iguales al inventario de carbono en la condición alterada como proporción del inventario de carbono de referencia definido en IPCC 2006GL2. Este método asume que los cambios ocurrirán a lo largo de 20 años y se asume que serán iguales a los inventarios promedios a largo plazo. Después de estimar el carbono en todas las clases LULC, ajustamos las cifras para terrenos deforestados para reflejar el impacto de las actividades en tierras de cultivo y pastizales sobre el contenido de carbono orgánico en suelos para los estimados de la línea base. Consultamos varios artículos en la literatura con grandes análisis de metadatos para ajustar los inventarios de carbono en pastizales y tierras de cultivo (Guo y Gifford, 2002; Don et al., 2011). En general, Bosque primario a pastizales (-12.1%), Bosque primario a tierras de cultivo (-25.2%), Bosque primario a cultivos perennes (-30.3%), y Bosque primario a bosque secundario (-8.6%).

10. Estimación de la Media y el Error Estándar de las Reservas de Carbono

La estimación de las reservas de carbono en todas las clases LULC para las áreas de proyecto de BioREDD se basa en las reservas de carbono vivo en superficie derivadas de 83,000 Ha de datos LiDAR intersectados por las clases de uso de tierra y cubierta vegetal según lo descrito en los informes 8 y 9. Estimamos la reserva subterránea, la madera muerta en pie y en piso, las reservas de carbono no forestal, los desechos usando modelos y factores desarrollados anteriormente sobre cada Ha de la reserva en superficie desarrollada por LiDAR. El método se resume así:

$$AGT = CF_{AG} \times (1.483 AGB_{10cm}^{-0.0613})$$

$$AGNT = CF_{AGNT} \times (0.832 AGB_{10cm}^{0.346})$$

$$BG = CF_{BG} \times (0.489 AGB^{0.89})$$

$$LDW = CF_{LDW} \times \left(\frac{0.0353}{f} AGB_{10cm}^{1.093} \right)$$

$$SDW = CF_{SDW} \times \left(\frac{0.000484}{f} AGB_{10cm}^{1.614} \right)$$

$$DTS = CF_{DTS} \times (0.01538 AGB_{10cm}): \text{ Bosque Intacto}$$

$$DTS = CF_{DTS} \times (0.09438 AGB_{10cm}): \text{ Bosque degradado y secundario.}$$

donde

$$CF_{AG} = 0.485, CF_{BG} = 0.485, CF_{AGNT} = 0.47, CF_{LDW} = 0.485, CF_{SDW} = 0.485, CF_{DTS} = 0.485$$

10.1

En las anteriores ecuaciones, AGB_{10cm} es la biomasa estimada en superficie de datos LiDAR. Para cada tipo de cubierta vegetal, la media y la varianza seguirán las ecuaciones (9.2). También hemos ajustado la varianza y el error estándar tomando en cuenta la naturaleza agrupadora de los datos LiDAR. Como los datos LiDAR se han recolectado por un transecto, los errores de estimación de la biomasa tienen una correlación espacial y esta correlación espacial a su vez incrementa el error asociado con la estimación de la variación de grandes áreas.

$$E = \frac{z_v \sigma_L}{\sqrt{n}}$$

$$\sigma_L = \left(\sum_i \sigma_u^2 + 2 \sum_i \sum_j \rho(d) \sigma_u \sigma_{uj} \right)^{1/2}$$

$$\rho(d) = \exp\left(-\frac{d}{cr}\right),$$

10.2

E : error en la clase LULC

r : rango del semivariograma,

c : coeficiente de Moran-I

σ_u^2 : varianza asociada con el error del modelo LiDAR para cada pixel de 1-Ha i

El segundo término representa la varianza asociada con la correlación espacial.

En la anterior relación E es el error estándar asociado con un pequeño número para permitir un estimado preciso de la biomasa desde LiDAR y relacionado con observaciones en tierra. Para un intervalo de confianza del 95%, $z_v=1.96$. Sin una correlación espacial, $\sigma_L = \sigma_u$ y como n es un número grande (número de pixeles en cada clase LULC), el error estándar se volvería despreciable. Sin embargo, al incluir la correlación espacial, el error estándar se aproxima a un valor más realista.

Al usar las ecuaciones anteriores, estimamos las reservas de carbono en todas las clases LULC de las áreas de proyecto de BioREDD según se resume en la Tabla 10.1.

Tabla 10.1. Estimados de las reservas de carbono y errores estándar asociados con LULC en áreas de proyectos de BioRED. Las clases LULC son: 1. Bosque tropical intacto en tierra firme, 2. Bosques degradados o secundarios, 3. Pastizales, 4. Tierras de Cultivo, 5. Humedales, 6. Asentamientos y 7. Otras tierras.

Project Areas	LC	AGT	AGT-SE	BG	BG-SE	AGNT	AGNT-SE	LDW	LDW-SE	SOW	SDW-SE	DTS	DTS-SE	SOC	SOC-SE	
BMBC	1	137.85	3.05	38.89	2.24	3.24	0.34	12.79	0.54	3.66	0.29	2.06	0.45	76.86	5.38	
	2	53.98	3.71	16.88	2.76	2.67	0.42	17.8	1.11	6.26	0.73	2.9	0.94	72.87	3.9	
	3	15.78	4.47	8.75	3.43	1.67	0.5	11.16	1.34	1.33	0.79	1.8	1.12	59.55	5.19	
	4	20.51	2.48	10.16	1.92	1.67	0.28	11.1	0.74	1.02	0.4	1.78	0.62	64.64	5.41	
	5	15.96	4.33	5.71	3.36	1.98	0.49	0	0	0	0	0	0	47.29	4.37	
	6	6.56	0.91	2.59	0.77	0.8	0.1	0	0	0	0	0	0	0	54.3	4.09
	7	17.96	1.31	6.34	1.16	0.54	0.15	0	0	0	0	0	0	0	17.82	1.56
CDD	1	161.02	3.46	27.84	5.02	2.84	0.76	17.35	1.21	3.3	0.64	1.81	1	39.23	5.38	
	2	36.98	2.41	12.06	3.94	1.11	0.57	7.4	1.52	2.14	0.89	1.19	1.27	38.88	3.9	
	3	16.97	2.64	6.03	2.17	0.96	0.3	6.39	0.79	1.42	0.35	1.01	0.64	40.11	5.19	
	4	8.5	4.46	3.26	3.4	1.46	0.5	9.7	1.34	1.77	0.82	1.56	1.12	42.64	5.41	
	5	10.82	1.89	4.04	1.59	0.32	0.21	0	0	0	0	0	0	42.32	4.37	
	6	0.29	0.09	1.63	0.46	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	39.16	4.09
	7	34.03	3.48	11.2	2.78	1.02	0.39	0	0	0	0	0	0	0	43.44	1.56
SUPP	1	141.4	4.4	40	3.27	3.16	0.49	16.64	0.78	3.62	0.39	2.01	0.64	44.96	5.38	
	2	68.05	4.7	20.9	3.6	2.03	0.53	14.44	1.41	4.38	0.83	2.19	1.18	57.47	3.9	
	3	10.41	3.88	3.9	3.09	0.76	0.44	5.08	1.16	1.26	0.6	0.81	0.96	59.01	5.19	
	4	5.85	3.67	2.34	2.89	1.53	0.41	10.17	1.1	1.83	0.57	1.63	0.91	49.48	5.41	
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	8.31	0.66	3.19	0.63	0.25	0.07	0	0	0	0	0	0	0	52.96	4.09
	7	26.7	4.39	9.02	3.4	1.4	0.49	0	0	0	0	0	0	0	37.14	1.56
BMF_ACAPA	1	153.5	9.36	43.02	4.4	1.95	0.65	16.02	1.03	1.95	0.49	1.23	0.85	72.29	5.38	
	2	78.3	4.3	23.62	2.62	1.22	0.37	18.35	0.98	2.06	0.48	1.3	0.81	77.24	3.9	
	3	12.94	3.1	4.73	2.54	0.84	0.35	5.59	0.93	1.27	0.41	0.89	0.76	81.96	5.19	
	4	17.65	2.66	6.24	2.14	1.13	0.3	7.53	0.8	1.76	0.37	1.2	0.65	78.14	5.41	
	5	15.3	2.14	5.5	1.8	0.46	0.24	0	0	0	0	0	0	0	47.29	4.37
	6	7.28	0.54	2.84	0.5	0.22	0.06	0	0	0	0	0	0	0	72.1	4.09
	7	22.66	1.96	7.8	1.68	0.68	0.22	0	0	0	0	0	0	0	85.86	1.56
CAJAMBRE	1	136.08	3.56	38.79	2.63	3.3	0.4	13.06	0.63	3.8	0.32	2.1	0.52	60.55	5.38	
	2	69.33	4.6	21.09	3.47	2.83	0.52	18.87	1.38	6.97	0.86	3.09	1.16	57.67	3.9	
	3	17.18	3.57	9.17	2.85	1.12	0.4	7.44	1.07	1.87	0.54	1.19	0.88	65.46	5.19	
	4	28.53	2.92	12.51	2.23	1.76	0.33	11.71	0.88	3.31	0.51	1.88	0.73	61.62	5.41	
	5	24.09	3.53	8.23	2.67	2.22	0.4	0	0	0	0	0	0	0	47.29	4.37
	6	5.75	0.7	2.3	0.56	0.17	0.07	0	0	0	0	0	0	0	44.4	4.09
	7	5.8	0.12	2.32	0.11	0.17	0.01	0	0	0	0	0	0	0	17.81	1.56
CONCOSTA	1	148.83	4.3	41.77	3.19	3.18	0.48	16.82	0.76	3.65	0.38	2.02	0.63	54.53	5.38	
	2	81.77	4.34	24.43	3.31	2.16	0.49	24.34	1.3	4.72	0.77	2.34	1.09	61.74	3.9	
	3	15.76	3.18	8.74	2.62	0.77	0.36	5.15	0.96	1.17	0.42	0.82	0.78	76.72	5.19	
	4	22.16	3.14	10.65	2.5	1.41	0.35	9.43	0.94	2.48	0.47	1.51	0.78	52.12	5.41	
	5	23.51	2.84	8.06	2.37	0.71	0.32	0	0	0	0	0	0	0	61.48	4.37
	6	3.27	0.32	1.39	0.34	0.1	0.04	0	0	0	0	0	0	0	63.11	4.09
	7	16.48	1.71	5.87	1.48	0.49	0.19	0	0	0	0	0	0	0	67.55	1.56
MUTATA	1	129.27	4.5	36.72	3.26	3.58	0.51	14.15	0.8	4.35	0.44	2.28	0.67	61.34	5.38	
	2	71.79	5.59	21.76	4.15	3.05	0.63	20.36	1.68	7.97	1.13	3.35	1.42	99.52	3.9	
	3	16.35	4.52	8.92	3.4	1.69	0.51	11.27	1.36	3.37	0.86	1.82	1.14	60.97	5.19	
	4	29.79	4.65	12.87	3.49	2.24	0.52	14.96	1.4	5	0.9	2.43	1.18	73.18	5.41	
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	14.38	4.45	8.32	3.67	1.03	0.5	0	0	0	0	0	0	0	45.04	4.09
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RIO_PEPÉ_ACABA	1	130.79	4.09	37.11	3.02	2.87	0.46	11.36	0.73	3.12	0.37	1.82	0.6	20.72	5.38	
	2	52.51	3.9	16.47	2.9	2.63	0.44	17.5	1.17	6.13	0.76	2.86	0.99	18.33	3.9	
	3	15.88	3.79	8.78	2.9	1.53	0.43	10.18	1.14	2.83	0.65	1.63	0.95	19.3	5.19	
	4	27.7	3.11	12.27	2.37	1.73	0.35	11.54	0.93	3.26	0.55	1.85	0.78	19.39	5.41	
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	16.96	0.91	12.05	0.74	1.11	0.1	0	0	0	0	0	0	0	16.02	4.09
	7	32.55	3.56	10.76	2.7	1.58	0.4	0	0	0	0	0	0	0	15.72	1.56

11. Referencias

- Araujo T.M., Higuchi N., Carvalho Jr. J.A. Comparação de métodos para determinar biomassa na região amazônica (1996) Anais da Academia Brasileira de Ciências, 68 (SUPPL. 1), pp. 39-40.
- Chave, J., Condit, R., Lao, S., Caspersen, J. P., Foster, R. B., & Hubbell, S. P. (2003). Spatial and temporal variation of biomass in a tropical forest: results from a large census plot in Panama. *Journal of ecology*, 91(2), 240-252.
- Chave, J., Condit, R., Aguilar, S., Hernandez, A., Lao, S., & Perez, R. (2004). Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 359(1443), 409-420.
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., ... & Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145(1), 87-99.
- Chave, J., Réjou Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B., & Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global change biology*.
- Don, A., Schumacher, J., & Freibauer, A. (2011). Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks—a meta-analysis. *Global Change Biology*, 17(4), 1658-1670.
- Guo, L. B., & Gifford, R. M. (2002). Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global change biology*, 8(4), 345-360.
- Hiederer, H. y M. Köchy 2012. Global Soil Organic Carbon Estimates and the Harmonized World Soil Database. EUR Scientific and Technical Research series – ISSN 1831-9424 (en línea), ISSN 1018-5593 (impreso), ISBN 978-92-79-23108-7, doi:10.2788/13267.
- Higuchi, N., Carvalho Jr., J.A., 1994. Fitomassa e Conteúdo de Carbono de Especies Arboreas da Amazonia. Seminario Emisao x Sequestro de CO2 uma nova oportunidade de negocios para o Brasil, Companhia Vale do Rio Doce, Rio de Janeiro, pp. 125-153.
- Ladd, B., Laffan, S. W., Amelung, W., Peri, P. L., Silva, L. C., Gervassi, P., ... & Sheil, D. (2013). Estimates of soil carbon concentration in tropical and temperate forest and woodland from available GIS data on three continents. *Global ecology and biogeography*, 22(4), 461-469.

Mokany, K., Raison, R., & Prokushkin, A. S. (2006). Critical analysis of root: shoot ratios in terrestrial biomes. *Global Change Biology*, 12(1), 84-96.

Panagos P., Van Liedekerke M., Jones A., Montanarella L. European Soil Data Centre: Response to European policy support and public data requirements. (2012) Land Use

Policy, 29 (2), pp. 329-338. doi:10.1016/j.landusepol.2011.07.003.

Phillips, O. L., Malhi, Y., Higuchi, N., Laurance, W. F., Núñez, P. V., Vásquez, R. M., ... & Grace, J. (1998). Changes in the carbon balance of tropical forests: evidence from long-term plots. *Science*, 282(5388), 439-442.

Phillips, O. L., Aragão, L. E., Lewis, S. L., Fisher, J. B., Lloyd, J., López-González, G., ... & Andrade, A. (2009). Drought sensitivity of the Amazon rainforest. *Science*, 323(5919), 1344-1347.

Saatchi, S. S., Harris, N. L., Brown, S., Lefsky, M., Mitchard, E. T., Salas, W., ... & Morel, A. (2011). Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(24), 9899-9904.

Saldarriaga, J. C., Hoyos, D. Á., & Correa, M. A. (2011). Avaliação de processos biológicos unitários na remoção simultânea de nutrientes para minimizar a eutrofização. *Revista EIA*, (15), 129-140.

Sierra, C. A., del Valle, J. I., Orrego, S. A., Moreno, F. H., Harmon, M. E., Zapata, M., ... & Benjumea, J. F. (2007). Total carbon stocks in a tropical forest landscape of the Porce region, Colombia. *Forest Ecology and Management*, 243(2), 299-309.

Weisbin, C. R., Lincoln, W., & Saatchi, S. (2013). A Systems Engineering Approach to Estimating Uncertainty in Above Ground Biomass (AGB) Derived from Remote Sensing Data. *Systems Engineering*.